

Reduktion von Lüftungstechnik durch den Einsatz klimasteuernder Naturbaustoffe – Ergebnisse aus dem EU Forschungsvorhaben H-House und der Baupraxis

1 Einführung

Die größten Ressourcenverbraucher unserer Zeit sind die Gebäude oder Behausungen des Menschen sowohl in der Phase der Errichtung als auch im Betrieb. Der Gebäudesektor und damit auch die Architektur verbrauchen in Deutschland ca. 50% der fossilen Energieressourcen und verursachen ca. 60% des gesamten Müllaufkommens mit dem zugehörigen Bedarf an Ressourcen in der Errichtung.

Öl, Stahl und Beton haben uns Glauben gemacht die natürlichen Begebenheiten bei der Gestaltung von Gebäuden wenig beachten zu müssen. Immer neue Techniken zum Betrieb und zur Klimatisierung von Gebäuden waren die Zukunft. Der Klimawandel und die Ressourcenknappheit sind Aufforderungen zur Veränderung (Abbildung 1).

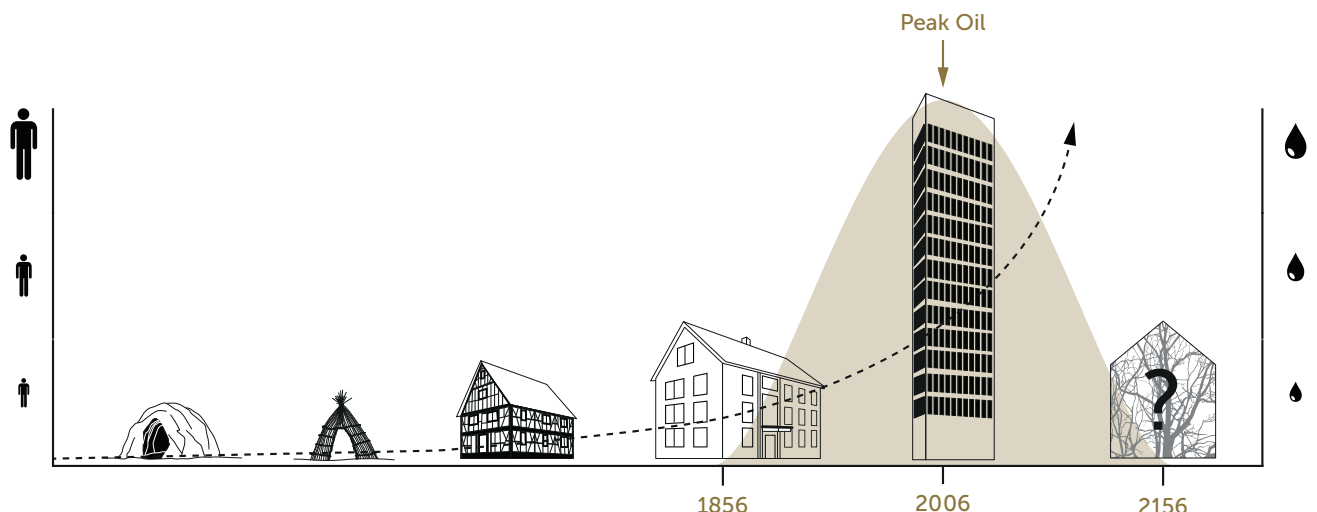
Das Voranschreiten der Reform des Bauwesens hat somit zentrale Bedeutung zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele und um unsere Gesellschaft zukunftsfähig zu machen. Klimaangepasste Architekturkonzepte und die Verwendung von klimaaktiven Natur-

baustoffen werden einen wesentlichen Beitrag zum Ressourcenschutz erbringen.

Die Gesundheit, das Wohlbefinden aber auch die Produktivität von Gebäudenutzern hängt sehr stark von der Raumluftqualität unserer gebauten Umwelt ab. Sanierte aber vor allem neue Niedrigenergiehäuser, hoch luftdicht entwickelt und gebaut, sind oftmals problematisch in Bezug auf erhöhte relative Luftfeuchtigkeiten und höhere Konzentrationen von Luftschadstoffen im Innenraum. Reduzierte Luftwechselraten wie sie im modernen Wohnungsbau heute üblich sind, verschärfen das Problem und verursachen in vielen Fällen Feuchtigkeits- bis hin zu Kondensatschäden, die zu Schimmelbildung führen können, was im schlimmsten Fall wiederum Allergien und Krankheiten hervorrufen kann.

Um diesen Problemen zu begegnen, werden Wohngebäude heute im Regelfall mit mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausgestattet, ungeachtet der damit verbundenen Nachteile in Bezug auf erhöhten Platzbedarf, zusätzliche Kosten,

Abb. 1 Was kommt nach dem fossilen Konsumzeitalter?



Systemwartung sowie eingeschränktem Nutzkomfort und -kontrolle.

Die Hauptkriterien für die Belüftung von Gebäuden lassen sich zusammenfassen in:

- Reduktion der Raumluftheuchte im Winter zur Vermeidung von Kondensat und Schimmel;
- Reduktion von Schadstoffen in der Raumlufte;
- Reduktion des CO₂ Gehaltes in der Raumlufte

Traditionelle Naturbaustoffe wie Holz und Lehm, aber auch Naturfasern wie Stroh, Hanf etc. können insbesondere Feuchte aber auch Schadstoffe aufnehmen und abgeben und somit steuern. Dieses Wissen wird heute auf Basis bauphysikalischer Kenntnisse, Untersuchungen von Minke [1] und Ziegert und Röhlen [2] und empirischen Erfahrungen in Naturbauhäusern angewendet.

Im Falle des sommerlichen Wärmeschutzes kommen oftmals Wärmepumpen oder andere aktive Systeme zur Kühlung von Gebäuden zum Einsatz, was ähnlich wie im Fall von mechanischen Lüftungssystemen einen zusätzlichen Energiebedarf im Betrieb, erhöhten Platzbedarf aber auch eine Erhöhung der Bau- sowie Instandhaltungskosten bedingt.

Die im Folgenden vorgestellte Studie, die im Rahmen des EU finanzierten Forschungsvorhabens H-House entstanden ist, schafft eine breite wissen-

schaftliche Basis für das Bauen mit reduzierter bzw. ohne mechanische Lüftung. Sie geht davon aus, dass es ressourcenschonendere Lösungsansätze gibt, die nicht nur die Anforderungen an die oben aufgeführten Aspekte erfüllen, sondern auch zu einer ganzheitlich verbesserten Wohngesundheit beitragen. Es soll nachgewiesen werden, dass sich durch den Einsatz von emissionsarmen, klimasteuernden Naturbaustoffen in Verbindung mit einer dampfdiffusionsoffenen Gebäudehülle und einem angemessenen Glasanteil, eine stabile Raumluftheuchte und ein gesundes Raumklima in Wohngebäuden einstellen lässt.

Im Rahmen des Projektes wird daher der Ansatz verfolgt, innovative, nachhaltige aber auch mittel- und langfristig kosteneffiziente Trennwandsysteme für den Neubau sowie die Sanierung von Wohngebäuden zu entwickeln, die einen Beitrag zu einem gesunden und komfortablen Innenraumklima leisten. Schwerpunktmäßig wird der Einsatz von Naturbaustoffen wie Holz und Lehm im Hinblick auf die hygroskopischen Eigenschaften sowie ihr positiver Einfluss auf die Steuerung der Raumluftheuchte untersucht. In einer speziell angelegten Materialentwicklung wird zudem versucht, durch die Zugabe von Aerogelen das Aufnahmevermögen von Lehmputzen in Bezug auf Feuchtigkeit, aber auch Luftschadstoffe zu erhöhen. Um eine Belastung der Naturbaustoffe auf die Raumluftequalität zu vermeiden, werden alle Baustoffe im Hinblick auf Schadstoffemission untersucht.

Tabelle 1 Übersicht der untersuchten Materialien

Funktion	Material	Stärke mm
Dekorative Materialien	Lehmfarbe, Marmormehlfarbe, Lehmstreichputz, Dispersionsfarbe	0,5 – 2
Putz	Lehmputz, Aerogel modifizierter Lehmputz,	3 – 15
Putzbewehrung	Flachsfaser und Glasfaser Putzbewehrung, systemkompatible Bewehrung	0,5
Kleber	Lehmkleber, systemkompatibler Kleber	2
Bekleidung	Lehmplatten, & Lehm Cellulose Platten, Holzweichfaser- und Holzweichfasersandwichplatten, Sperrholzplatten, Gipsfaser- und Gipskartonplatten, OSSB Platten (oriented strand straw board)	12,5 – 31
Dämmung	Holzweichfaserdämmplatten & -matten, Flachsdämmung, Hanfdämmplatte, Schafwolle, Stroh, recycelte Altkleider, Mineralwolle	40 – 80
Innendämmung (Außenwand)	Holzweichfaserdämmplatten, Calciumsilikatplatten, mineralische Dämmplatten	20 – 100
Tragende Innenwände	Brettschichtholz	100
Nicht tragende Innenwände (Platten oder Blöcke)	Lehmsteine, Holzweichfasersandwichblock mit Cellulosekern, Holzweichfasersandwichplatte mit Flachskern, Strohplatten, Porenbeton	60 – 120

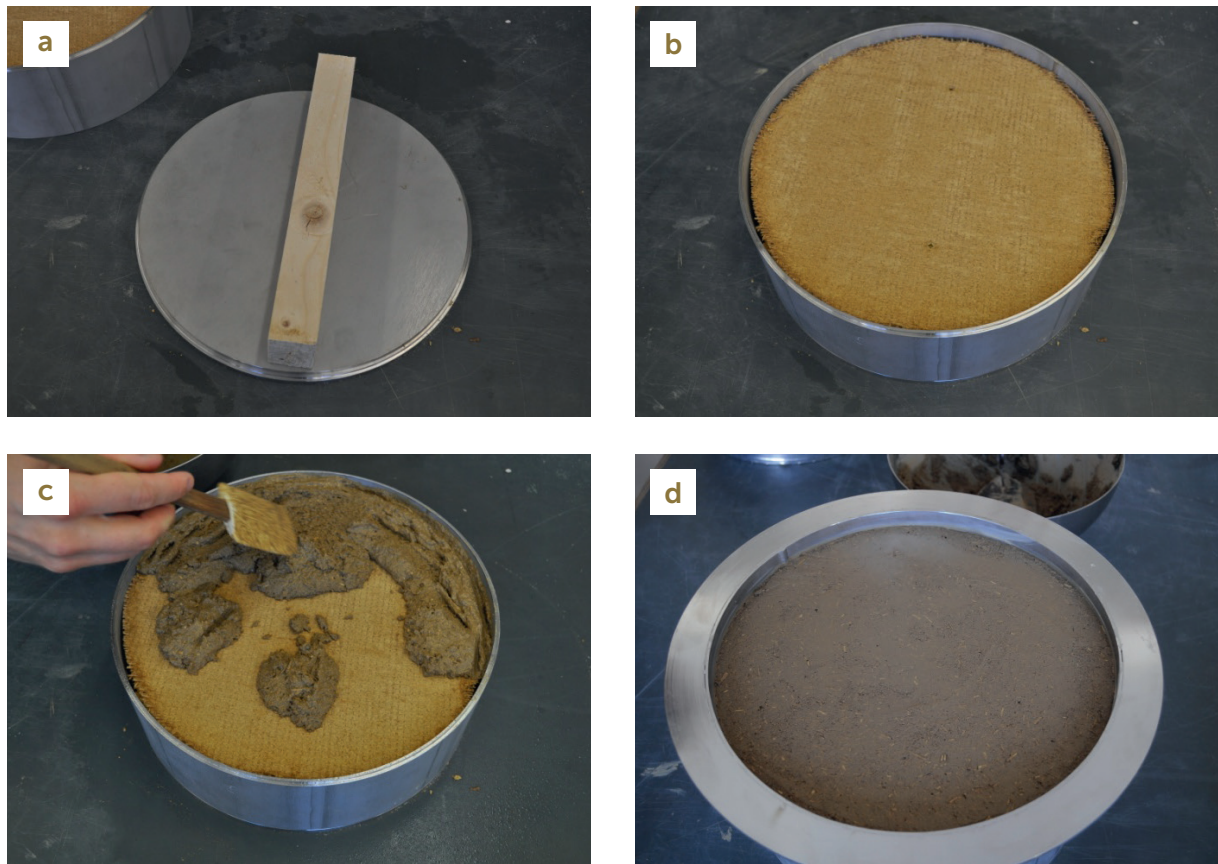


Abb. 2 Probenvorbereitung: (a) Holzständer, (b) Montage einer Lehmbauplatte mit darunterliegender Holzfaserdämmung, (c) Auftrag des Lehmklebers, (d) Auftrag des Lehmputzes und Montage eines Flansches zum Einbau in die Prüfkammer.

Die Studie wird ergänzt durch Ergebnisse aus einer experimentellen Untersuchung, in der in drei Berliner Wohnungen, die mit Naturbaustoffen bzw. konventionellen Materialien ausgestattet wurden, das Innenraumklima (Temperatur sowie relative Raumluftfeuchte) aufgezeichnet wurde.

2 Materialliste und Testmethoden

2.1 Materialliste

Die Materialauswahl wurde auf Grundlage eines Holz-Lehmbausystems getroffen und umfasst einen Lehmputz, eine Holzweichfaserplatte, Holzweichfaserdämmung sowie Lehmsteine. Eine weitere Steigerung der ohnehin schon gut adsorbierenden Lehmputze in Bezug auf Wasserdampf und Schadstoffe wurde durch die Zugabe von Aerogelen (Aerogel Granulat CMS_{GI}) sowie zwei verschiedene Aerogel Pulver CMS_{PI} und ND_{PI}) untersucht. Als Referenz wurden konventionelle Materialien, die standardmäßig bei Trennwänden zum Einsatz kommen, untersucht und für ein Benchmarking herangezogen. Insgesamt wurden ca. 100 ausgewählte Materialien untersucht, die nach ihrer Funktion im Bauteil in Tabelle 1 aufgeführt sind.

2.2 Wasserdampfadsorptionstests

Mit dem in der DIN 18947 [3] beschriebenen, optionalen Testverfahren lässt sich die Kapazität von Lehmputzmörteln in Bezug auf die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit aus der Raumluft bestimmen. Der Versuch wird über einen Zeitraum von 12h durchgeführt. Da Vorversuche jedoch ergeben haben, dass die maximale Adsorptionskapazität nicht lehmbasierter Naturbaustoffe aufgrund der zum Teil deutlich größeren Materialstärken nach 12 Stunden nicht erreicht war und auch die Desorption, anders als bei Lehmputzen, nicht vollständig erfolgte, wurde der Test so modifiziert, dass fünf Adsorptions- bzw. Desorptionszyklen über jeweils 12 Stunden gefahren wurden, sodass zum einen die Aufnahmekapazität, potenzielle Hystereseeffekte aber auch eine verlangsamte Desorption entsprechend untersucht und analysiert wurden.

2.3 Emissionstests

Im Rahmen des Forschungsprojekts lag der Fokus nicht auf der üblichen Betrachtung der Emissionen aus den einzelnen Baustoffen, sondern es sollten die Auswirkungen kompletter Wandaufbauten auf die In-

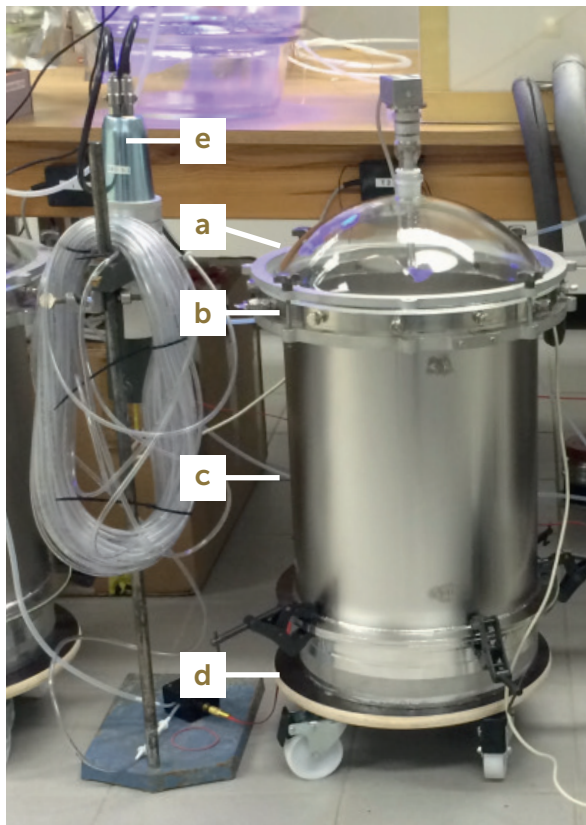


Abb. 3 Emissionsprüfkammer mit Lucas-Szintillationszelle zur Radonmessung: (a) Glasdeckel mit Rührer, (b) Anschlussring, (c) Hohlzylinder, (d) Probenaufnahme, (e) Lucas-Zelle

nenraumluftqualität untersucht werden. Die Anforderungen an die Prüfung ergeben sich aus den entsprechenden Prüfnormen [4-8].

Die Materialien wurden Lage für Lage in Probenahmen aus Edelstahl eingebaut (Abbildung 2) und anschließend in die eigens für diese Untersuchungen entworfenen Prüfkammern eingebracht (Abbildung 3).

Die Aufbauten blieben für maximal 28 Tage in den Kammern. In vielen Fällen konnte die Untersuchung aber vorzeitig abgebrochen werden, wenn keine Emissionen (Formaldehyd, VOCs, SVOCs, Radon) mehr nachzuweisen waren. Die Analyse erfolgte für Formaldehyd mittels Probenahme auf DNPH (2,4-Dinitrophenylhydrazin) gefolgt von HPLC-DAD nach [4]. Die VOC-Probenahme wurde mit Tenax TA®, gefolgt von TD-GC/MS [5], durchgeführt und die Radonexhalation mittels einer Durchfluss-Szintillationskammer (Lucas-Zelle) bestimmt. Die DNPH- und Tenax-Probenahmen erfolgten jeweils am 3., 10., 14. und 28. Tag nach Beladung der Prüfkammer, die kontinuierliche Radonmessung über 24 Std. in der Mitte des Versuchszeitraums.

12 Einzelmaterialien und 13 Materialkombinationen aus den in Tabelle 1 aufgelisteten Baumaterialien wurden auf ihre Emissionen getestet. Um eine Bewertung der Ergebnisse vornehmen zu können, wurde die Auswertung nach dem Bewertungsschema des AgBB (Ausschuss für die gesundheitliche Bewertung von Bauprodukten) [9] durchgeführt. Dieses beinhaltet folgende Kriterien:

- TVOC (Gesamt-VOC): Summe der Konzentration aller Einzelsubstanzen, wenn die Konzentration $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ übersteigt innerhalb des Retentionsbereichs C6–C16. Der TVOC darf $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ am 28. Probenahmetag nicht übersteigen.
- ΣSVOC : Summe der Konzentration aller Einzelsubstanzen, wenn die Konzentration $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ übersteigt innerhalb des Retentionsbereichs > C16–C22. Der ΣSVOC darf $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ am 28. Probenahmetag nicht übersteigen.
- Kanzerogene Stoffe der EU-Kategorien 1 und 2 oder EU-Kategorien 1A und 1B.
- Bewertbare Stoffe: Alle VOCs mit einem NIK-Wert (Niedrigste Interessierende Konzentration); diese Stoffe sind im Anhang des Bewertungsschemas gelistet; $R \leq 1$.
- Nicht bewertbare Stoffe: Summe aller nicht identifizierbaren VOCs und mit unbekannten NIK. Sie dürfen am 28. Probenahmetag $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht überschreiten.

Der sogenannte R-Wert wird aus den gemessenen Konzentrationswerten der bewertbaren Stoffe am 28. Probenahmetag berechnet oder früher, wenn die Prüfung vorzeitig beendet wird. Er ist ein dimensionsloser Summenparameter, der gemäß Gleichung (1) berechnet wird und nicht größer als 1 sein darf.

$$R_i = \sum_i \left(\frac{c_i}{\text{NIK}_i} \right) \quad (1)$$

Es sind c_i die gemessene Konzentration eines bewertbaren VOCs und NIK_i der in Anhang 1 des AgBB-Schemas gelistete NIK-Wert des bewertbaren Stoffs.

Es sei dabei angemerkt, dass das Schema in der Praxis nur auf die Prüfung von Einzelmaterialien angewendet wird und in den Fällen der Sandwichelemente daher nur eine eingeschränkte Beurteilung möglich ist.

2.4 Adsorption von Luftschadstoffen

Diese Untersuchungen erfolgten gemäß ISO 16000-24 [10] zur Bewertung des Aufnahmevermögens der

Materialien gegenüber ausgesuchter VOCs unterschiedlicher Flüchtigkeit und Polarität (1-Pentanol, Hexanal, n-Butylacetat, α -Pinen und n-Dekan). Dazu wurde in die in Abschnitt 2.4 beschriebenen Prüfkammern ein aus diesen Komponenten zusammengesetztes Gasgemisch im Konzentrationsbereich von 200 bis 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einer Vorrichtung nach [11] kontinuierlich eingespeist und die Abnahme der Konzentrationen aufgrund der materialseitigen Aufnahme bestimmt. Als Bezugspunkt für die Bewertung dienten die Konzentrationen jeder hinzudotierten Substanz, die 24 Std. nach Beladung der Prüfkammern gemessen wurden. Die Probenahmen erfolgten mindestens am 1., 3., 7., 14. und 28. Tag nach Beladung, ggf. auch häufiger.

Getestet wurden insgesamt neun Materialproben, wobei es sich bei drei Proben um mehrkomponentige Aufbauten handelte (Tabelle 2). Zur Beurteilung des Aufnahmevermögens werden der Sorptionsfluss F_m (Gleichung 2) einer jeden Verbindung und die Gesamtsorptionsmasse ρ_{Ac} (Gleichung 3) herangezogen.

$$F_m = \frac{(\rho_{in,t_e} - \rho_{out,t_e}) \times q_c}{A} \quad (2)$$

$$\rho_{Ac} = \sum_i (F_{m,i} \times \Delta t_{e,i}), \text{ mit } \Delta t_{e,i} = t_{e,ij} - t_{e,ij-1} \quad (3)$$

Es sind ρ_{in,t_e} die Konzentration der Zielkomponente nach Ablauf der Zeit t_e , ρ_{out,t_e} die VOC-Konzentration in der Prüfkammer nach Ablauf der Zeit t_e , q_c die Luftdurchflussrate in der Prüfkammer und A die exponierte Oberfläche des Materials.

Als Zeitpunkt für die Berechnung von ρ_{Ac} wird die halbe Standzeit herangezogen, die aus der Kurvenfunktion von F_m berechnet wird. Sie ist definiert als der Zeitpunkt, an dem das Material nur noch die halbe Aufnahmekapazität aufweist als zu Beginn der Prüfung.

2.5 Monitoring von Realräumen

Aus einer empirischen Untersuchung, die in drei verschiedenen Berliner Wohnungen von August – September 2012 bzw. von November 2012 – Januar 2013 durchgeführt wurden, wurden Monitoring Daten für eine Studie des Innenraumklimas herangezogen. Die Wohnungen waren entweder mit natürlichen oder konventionellen Baustoffen ausgestattet. Die Messungen wurden mit Miniatur-Sensoren und einem Datenerfassungssystem (iButton®) durchgeführt,

die die Außentemperatur, Raumlufttemperatur sowie die interne und externe relative Luftfeuchte aufgezeichnet haben [12].

3 Ergebnisse

3.1 Wasserdampfadsorptionstests

Tests wurden für Baustoffe (Tabelle 1) auf Materialebene (Abbildungen 4 und 5), aber auch auf Komponentenebene (Abbildung 6) durchgeführt. Die Ergebnisse sollen zum einen Planern die Möglichkeit bieten, geeignete Materialkompositionen in Abhängigkeit von den spezifischen Anforderungen (Raumgröße, Belegungsdichte etc.) bestimmen zu können. Zum anderen soll das Potenzial von gesamten Wandaufbauten untersucht werden, inwieweit saisonale Klimaschwankungen ausgeglichen werden können und sich ein komfortables Raumklima einstellt.

Versuchsergebnisse in Abbildungen 4 und 5 zeigen, dass modifizierte und reine Lehmputze sich durch eine überdurchschnittliche Wasserdampfadsorptionskapazität auszeichnen, die bis zu dreifach höher ist als die von Gipskarton- bzw. Gipsfaserplatten, wie auch nachgewiesen in [1], [13]. Auch Lehmplatten, Lehmcelluloseplatten, und Holzweichfaserplatten weisen ein außergewöhnliches Potenzial in Bezug auf die Feuchtespeicherung auf. Gipsfaserplatten liegen im Bereich zwischen Lehmputzen und Gipskartonplatten.

Eine Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse für Bekleidungsplatten zeigt Abbildung 5. Die Materialien wurden in den am häufigsten verwendeten Materialstärken für Standard Trennwand Anwendungen getestet und obwohl sie sich unterscheiden, scheint ein direkter Vergleich der Materialien nützlich zu sein, um die leistungsfähigsten Materialien bzw. deren Kombination aufzuzeigen. Lehmplatten schneiden trotz geringerer Materialstärke im Vergleich zu Holzweichfaserplatten ein wenig besser als diese ab. Es gibt aber auch zwischen unterschiedlichen Produkten zum Teil erhebliche Unterschiede. So adsorbieren die Lehmplatten 3.1.1 und 3.1.3 nach 12 h ca. 40 g/m^2 mehr als das Vergleichsprodukt 3.1.2.

Unterschiedliche Wandaufbauten aus Naturbaustoffen aber auch konventionellen Materialien (Benchmark) wurden über einen Zeitraum von fünf Tagen getestet. Dabei wurde u.a. die Auswirkung von Naturdämmstoffen auf Basis von Holzweichfaser im Vergleich zu Mineralwolle untersucht (Abbildung 6).

Abb. 4 Ergebnisse Wasserdampfsorptionstests (DIN 18947) von modifizierten und reinen Lehmputzen (Mischungsverhältnisse nach Volumen)

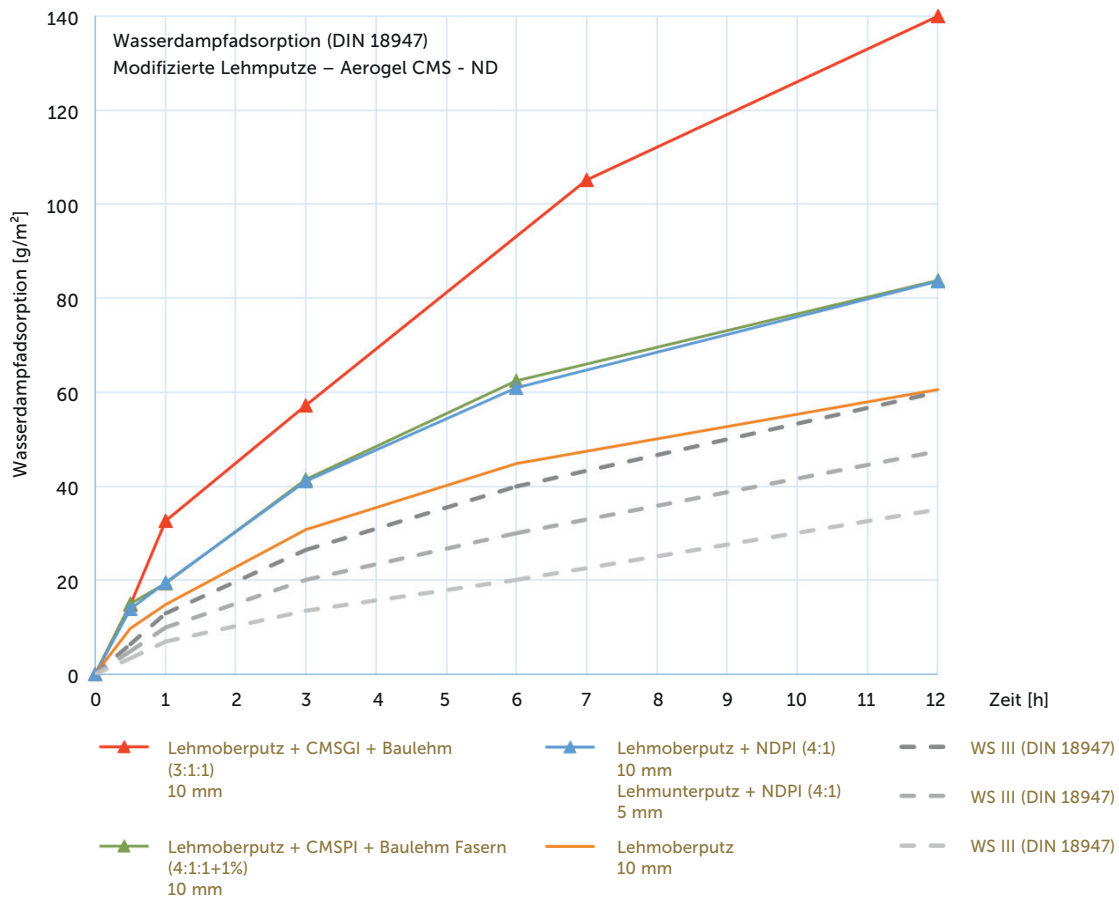


Abb. 5 Ergebnisse Wasserdampfsorptionstests (DIN 18947) Bekleidungsplatten

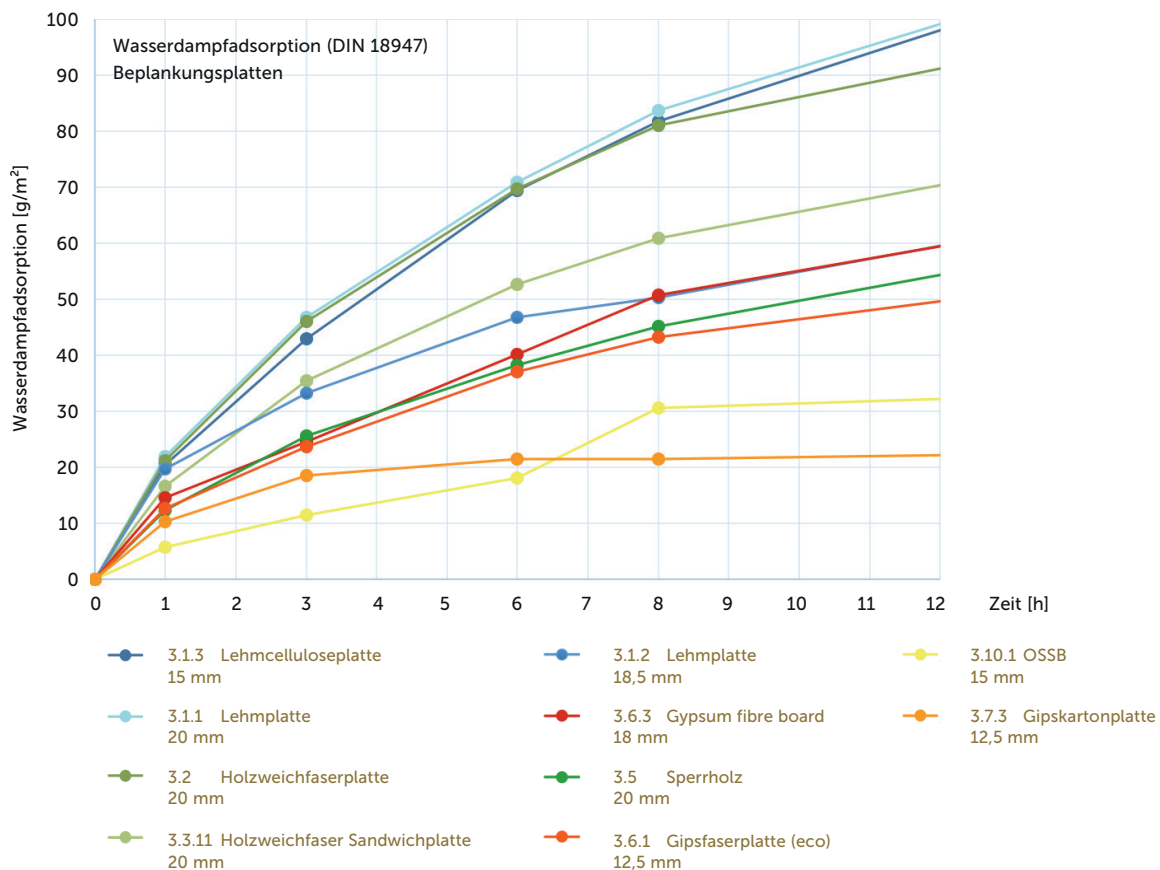
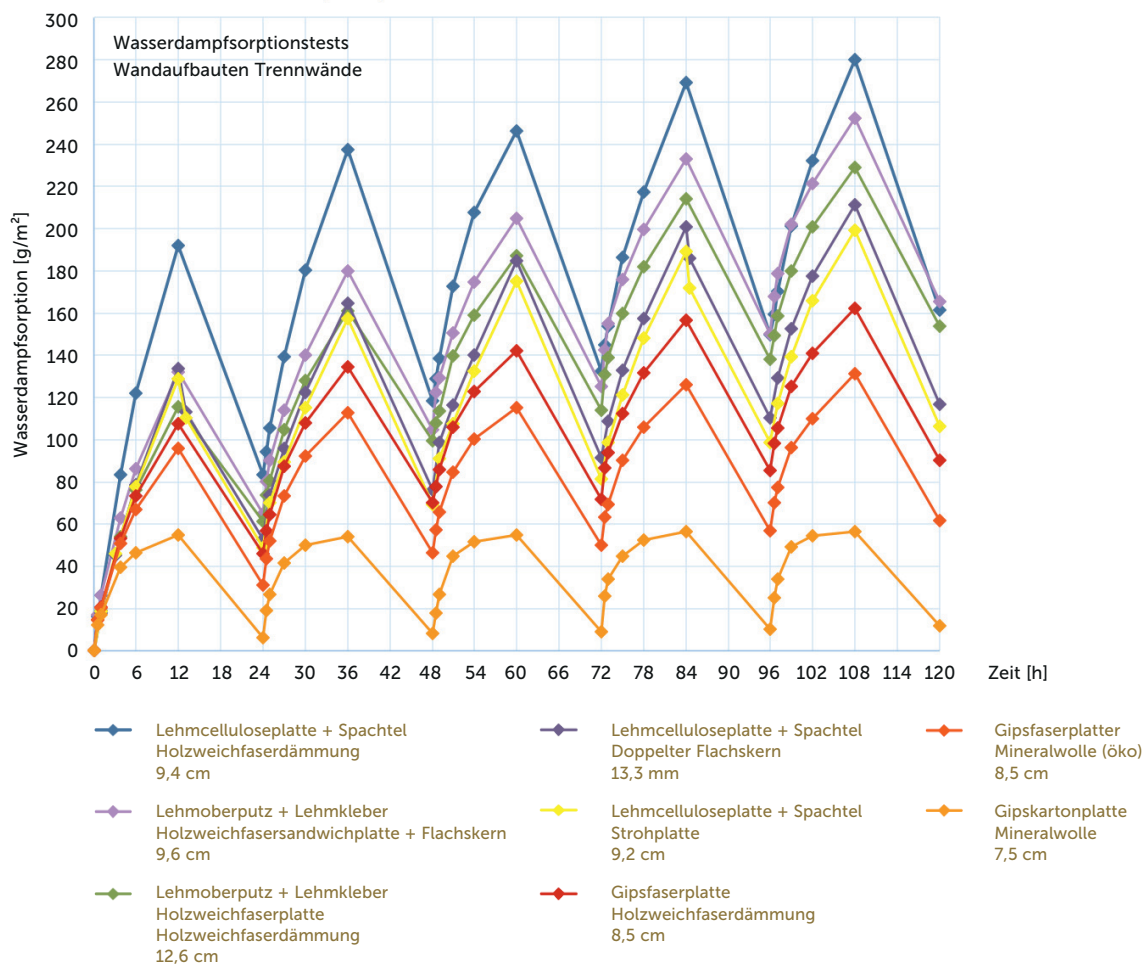


Abb. 6 Ergebnisse Wasserdampfsorptionstests (fünf Zyklen Ad- und Desorption) von Wandaufbauten



Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass zum einen die Dämmebene im Wandaufbau aktiviert wird und zum anderen, dass im Fall eines Gipsfaserwandaufbaus die Naturfaserdämmungen zu einer ca. 20% höheren Speicherkapazität der Wand führen.

Im direkten Vergleich von Holzweichfaser, Stroh und Flachs mit konventionellen Aufbauten wie Gipskarton oder Gipsfaser zeigen die Ergebnisse, dass die Aufbauten mit Naturbaustoffen deutlich besser adsorbieren, als die konventionellen Wandaufbauten (Abbildung 6).

3.2 Emissionstests

Generell zeichnen sich alle Materialien und Materialkombinationen durch ein geringes Emissionsniveau bezüglich Formaldehyd, VOCs und SVOCs sowie Radon aus. In vielen Fällen konnte die Prüfung vorzeitig – nach dem 10. Probenahmetag – abgebrochen werden, und zwar dann, wenn die Emissionen gleich oder kleiner als die Hälfte der AgBB-Anforderungen für den 28. Probenahmetag waren.

Von den 25 getesteten Materialien oder Materialkombinationen würden zwei kombinierte Proben das AgBB-Schema nach strenger Auslegung nicht bestehen (vgl. Abschnitt 4.2).

3.3 Adsorption von Luftschadstoffen

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Sorptionstests bzgl. der Leistungsfähigkeit der untersuchten Materialien zur Luftschadstoffaufnahme als Einzelsorptionsmasse für jedes Modell-VOC sowie als Gesamtsorptionsmassen aufgeführt. wird als Vergleichsparameter für die getesteten Materialien untereinander verwendet.

3.4 Monitoring von Realräumen

Abbildung 7 und 8 zeigen Messungen die im Winter 2012/13 in Berlin in drei Wohnungen in Bezug auf die relative Luftfeuchte durchgeführt wurden. Da es sich bei Wohnung 3 um ein unsaniertes Gebäude handelt, werden die Ergebnisse an dieser Stelle nicht diskutiert. In Wohnung 1 (Naturbaustoffe) wurden Messungen in der Küche sowie im Badezimmer bzw. in Wohnung 2

Tabelle 2 Gesamtsorptionsmassen der Modell-VOCs auf den getesteten Materialproben bei halber Standzeit in mg/m³.
Getestet wurden sowohl Einzelmateriale (M) als auch Wandaufbauten (W).

Nr.	Aufbau	Dicke mm	1-Pentanol CAS 71-41-0	Hexanal CAS 66-25-1	Butylacetat CAS 123-86-4	α -Pinen CAS 80-56-8	n-Dekan CAS 124-18-5	Σ
1 (M)	Lehmoberputz mit Stroh (EPRF)	5	7,9	6,0	12,6	0,0	0,0	26,5
2 (M)	Lehmoberputz mit Stroh (EPRF) (4 Teile)	5	8,7	7,9	18,0	0,0	0,0	34,6
	ND Aerogel Powder hydrophilic (NDPI) (1 Teil)							
3 (M)	Lehmoberputz mit Zellulose (EPFF) (4 Teile)	3	38	21,9	27,3	0,0	0,9	88,1
	ND Aerogel Powder hydrophilic (NDPI) (1 Teil)							
	Lehmunterputz mit Stroh (EPB) (4 Teile)	12						
	ND Aerogel Powder hydrophilic (NDPI) (1 Teil)							
4 (M)	Lehmputz Mineral M16 (3 Teile)	15	30,4	24,0	32,6	0,0	1,0	> 88,0
	ND Aerogel Powder hydrophilic (NDPI) (1 Teil)							
	Bambusfasern							
5 (M)	Lehmoberputz mit Zellulose (EPFF)	3	3,2	3,0	5,1	0,0	0,0	11,3
6 (M)	Lehmoberputz mit Zellulose (EPFF) (4 Teile)	3	6,6	4,2	11,0	0,0	0,0	21,8
	ND Aerogel Powder hydrophilic (NDPI) (1 Teil)							
7 (W)	Kreide, pflanzliche Kaseinfarbe	0,25	6,0	1,9	1,8	0,0	0,8	10,5
	Gipsfaserplatte (speziell zur Schadstoffsorption)	12,5						
	Fugenkleber	n/a						
	Fugenfüller	0,5						
	Holzständer	60						
	Holzfaserdämmmatte	60						
8 (W)	Lehmoberputz mit Stroh (EPRF) (3 Teile)	10	36,3	32,2	57,1	0,0	0,9	> 126,5
	Tonpuder (1,5 Teile)							
	CMS Aerogel Granulate hydrophilic (CMSGI) (1 Teil)							
	Lehmkleber (4 Teile)	3						
	Flachsfaserbewehrung							
	Holzfaserplatte	20						
	Holzständer	60						
	Schafwolle	60						
9 (W)	Füllmasse	1,5	9	2,3	11,9	0,0	1,7	24,9
	Glasfaserbewehrung							
	Lehm-Zellulose-Platte	15						
	Holzständer	60						
	Holzfaserdämmmatte	40						

(konventionelle Baustoffe) in der Küche, im Badezimmer und zusätzlich im Elternschlafzimmer durchgeführt. Die Messergebnisse (Abbildung 7 + 8) zeigen, dass in Wohnung 1 die relative Luftfeuchte stabiler ist als in Wohnung 02. Sie liegen überwiegend in einem gesunden und komfortablen Bereich von 50% – 60%. Ausnahme bilden einige Zeiträume, die für das Bad ermittelt wurden, die zum Teil höher als 60% liegen. Sie sind auf ein fehlerhaftes Nutzerverhalten zurückzuführen, da die freie Fensterlüftung nach dem Duschen nicht ausreichend lange durchgeführt wurde. Der Nutzer wurde in der Zwischenzeit über diesen Umstand informiert und das angepasste Lüftungsverhalten hat zu Messwerten für die relative Luftfeuchte geführt, die unter 60% liegen. Da Vergleichsmessungen in Wohnung 02 aber nur im Zeitraum November 2012 bis Januar 2013 durchgeführt wurden, werden hier auch nur diese Ergebnisse präsentiert.

Zu den Messergebnissen ist anzumerken, dass der Winter in 2012/13 nicht sonderlich kalt und somit die Außenluftfeuchte nicht besonders niedrig war. Ein kälterer Winter würde vermutlich zu noch signifikanteren Ergebnissen für Wohnung 02 führen, in denen die Raumluftfeuchte deutlich unter 30% liegen würden.

4 Diskussion

4.1 Wasserdampfadsorptionstests

Abbildung 4 zeigt das Potential von Aerogelen, die Wasserdampfadsorption von Lehmputzen signifikant zu erhöhen. Während die Zugabe von Aerogel-Typ ND_{PI} (Pulver) nur geringfügig die Feuchtigkeitsaufnahme steigert, zeigte die mit Aerogel-Typ CMS_{GI} (Granulat) modifizierte Probe eine signifikante Zunahme der Feuchtigkeitsaufnahme (> 130%) nach 12 h im Vergleich zu dem reinen Lehmputz. Darüber hinaus konnte die Adsorptionsgeschwindigkeit des reinen Lehmputzes um rund 100% gesteigert werden.

Die Zugabe von Aerogel-Typ CMS_{PI} (Pulver) erzielte ähnliche Ergebnisse im Vergleich zu der mit Aerogel-Typ ND_{PI} (Pulver) modifizierten Probe, obwohl das ND basierte Muster als Putzsystem aus modifiziertem Ober- und Unterputz in einer Gesamtstärke von 15 mm aufgetragen wurde und somit über eine 5 mm dickere Gesamtputzstärke verfügt, die sich aber nicht in der Speicherkapazität niederschlägt. Die hervorragenden Ergebnisse der mit CMS_{GI} angereicherten Probe sind höchstwahrscheinlich auf die Feinstruktur des Aerogels selbst zurückzuführen, das über ein breiteres Spektrum an unterschiedlichen

Abb. 7 Ergebnisse Monitoring RH im Winter Wohnung 01 mit Naturbaustoffen ausgestattet

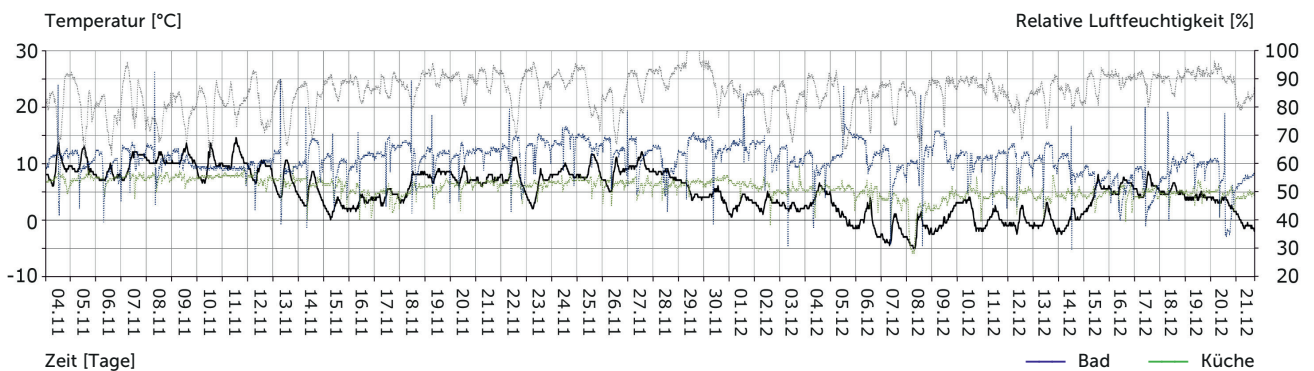
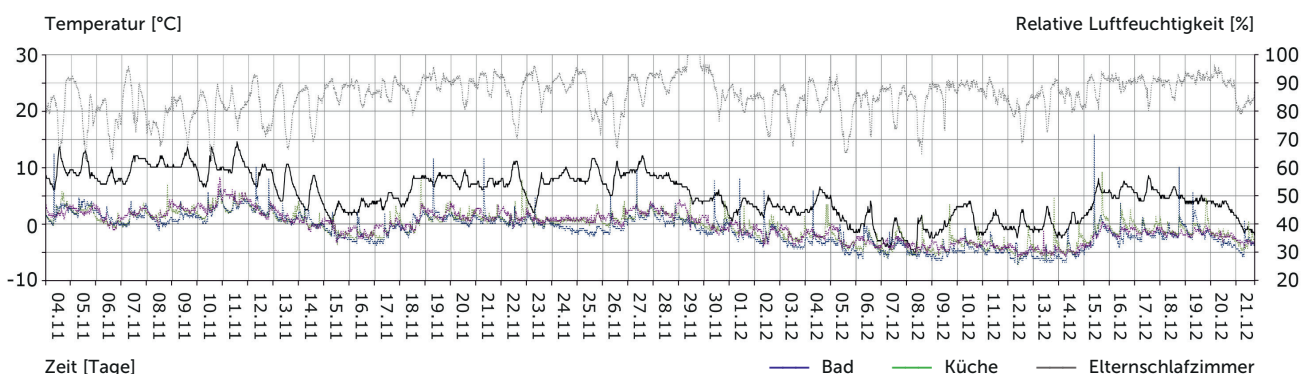


Abb. 8 Ergebnisse Monitoring RH im Winter Wohnung 02 mit konventionellen Baustoffen ausgestattet



Porengrößen verfügt. Was jedoch hauptsächlich zur besseren Adsorption geführt hat, ist, dass sich bei dem Granulat bei gleichen Volumenanteilen des Mischungsverhältnisses eine ca. drei bis fünffach größere Gesamtmenge an Aerogel (im Bezug auf das Gewicht) in den Lehmputz einmischen ließ, als im Vergleich zum Puder und die Anforderungen der DIN 18947 [3] weiterhin erfüllt wurden.

Der Vergleich der Bekleidungsplatten in Abbildung 5 zeigt die bemerkenswert hohe Feuchtigkeitsadsorptionskapazität von Lehm-, Celluloseplatten sowie Holzweichfaserplatten im Vergleich zu Standard-Gips und Gipsfaserplatten. Für die lehm-basierten Platten sind in erster Linie die Tonminerale für die hervorragenden Adsorptionsergebnisse verantwortlich, während für die Holzfasern die hohe Porosität und die dementsprechend große Oberfläche ein Grund sind. Die Adsorptionskapazität von Gipsfaserplatten liegt zwischen der von Lehm- und Gipskartonplatten und bietet eine robuste und gute Lösung, wenn Budget und Bauzeit ausschlaggebende Faktoren sind.

Obwohl diese Studie nicht vollständig ist, konnte beobachtet werden, dass gleichartige Materialien sehr unterschiedliche Ergebnisse erzielen. Das wurde vor allem bei einem Vergleich der Proben 3.1.1 und 3.1.2 offensichtlich (Abbildung 5). Ähnliche Tendenzen, die sich aber noch deutlicher markierten, wurden für Holzfasern und Calciumsilikatplatten beobachtet.

Materialuntersuchungen auf Komponentenebene zeigen die überragende Performance von Wandaufbauten mit natürlichen Baustoffen im Vergleich zu herkömmlichen Wandaufbauten. Abbildung 6 zeigt die Wirkung der Lehm-Celluloseplatte, reinem Lehmputz in Kombination mit Holzweichfaserplatten und Holzweichfaserdämmung sowie Holzweichfaser Sandwichplatten mit Flachkern im Vergleich zu herkömmlichen Wandaufbauten aus Gipskartonplatten und Mineralwolle. Der genaue Nutzen für die Raumluftqualität in Bezug auf saisonale Veränderungen muss im Rahmen des Vorhabens noch näher bestimmt werden, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass Gebäude die mit solchen Wänden ausgestattet sind, von Prozessen der Verdunstungskühlung während der heißen Sommermonate profitieren.

4.2 Emissionstests

Die meisten der getesteten Materialien bzw. Materialkombinationen verfügten über einen Lehmputzabschluss verschiedener Modifikation und Schichtdicke, andere wiederum über konventionelle Gipskarton- oder Gipsfaserplatten mit handelsüblichem Anstrich bzw. über mineralische Ausbauplatten mit Anstrichen naturbasierter Zusammensetzung.

Es kann angenommen werden, dass die festgestellten Emissionen hauptsächlich von der letzten Materialschicht stammen, weil sie direkt zum freien Raumvolumen exponiert ist. Da jedoch grundsätzlich diffusionsoffene Materialien verwendet wurden, diffundieren die Emissionen anderer Bestandteile wie Dämmmaterialien, Ausbauplatten, Bewehrungen, Ständerwerk, etc. ebenfalls durch alle Materialschichten und werden als Gesamtemission erfasst. Ferner ist denkbar, dass der Lehmputz, insbesondere der mit Aerogelzusatz, die Emissionen aus den unteren Schichten vorübergehend durch Sorption abpuffert. Die Ergebnisse der Adsorptionstests (Abschnitte 3.4 und 4.4) lassen diese Vermutung zu.

Nahezu alle Materialien und Materialkombinationen die Bewertung nach AgBB bestehen, was bedeutet, dass sie für die Verwendung im Innenraum tauglich sind. Lediglich zwei Proben (Abbildung 9, a und b) würden bei strenger Bewertung als Gesamtmaterial durchfallen. Besonders fällt der hohe Gehalt an nicht bewertbaren Stoffen auf [9], der bei Probe lit. a über den Prüfzeitraum stark abfällt, im Gegensatz zu Probe lit. b, von der insgesamt ein untypisch konstantes Emissionsprofil ausgeht. Die Probe lit. a bestand hauptsächlich aus Lehm-Baustoffen, wohingegen in Probe lit. b ein Holzfaserdämmblock (Konifere) mit Zellulosekern ein wesentlicher Bestandteil war. Die Dämmblöcke waren zudem mit einem Spezialkleber verbunden. Einige der bei diesem Aufbau bestimmten Emissionen sind dem Holzbestandteil zuzuordnen (Pentanal, Hexanal, 2-Furaldehyd), die Alkanverbindungen (C11 bis C13) mit großer Wahrscheinlichkeit dem Kleber. Der ausschlaggebende Grund für eine potentielle Ablehnung nach AgBB liegt in der Höhe der Gesamtkonzentration an nicht bewertbaren Stoffen am 28. Tag ($>0,1 \text{ mg/m}^3$), deren Herkunft nicht sicher bestimmt werden kann.

Die Anwendung des AgBB-Schemas kann hier allerdings nur zur Orientierung dienen, da es für die Be-

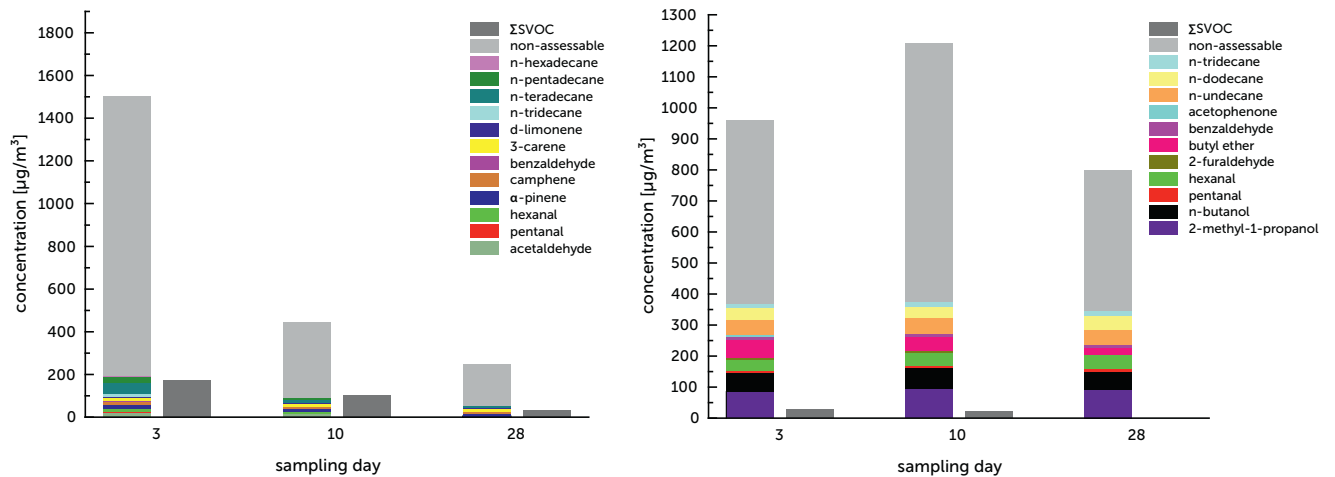


Abb. 9 Emissionen zweier Proben, die nach AgBB-Maßstäben nicht für den Innenraum geeignet wären

wertung einzelner Baustoffe entwickelt wurde und nicht für komplexe Zusammensetzungen.

Radon ist kein Bestandteil der AgBB-Bewertung. Die Werte liegen insgesamt im sehr niedrigen Konzentrationsbereich, in den meisten Fällen dicht an der Nachweisgrenze.

4.3 Adsorption von Luftschadstoffen

Wie Tabelle 2 entnommen werden kann, zeigen die Proben Nr. 3, Nr. 4 und Nr. 8 das beste Sorptionsvermögen, gefolgt von Probe Nr. 2. Wandaufbau Nr. 8 schneidet bemerkenswert gut ab, wobei angemerkt werden muss, dass nach Beladung der Prüfkammer der Lehmputz am Rand leicht geschrumpft war, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass Testgas durch die entstandenen Zwischenräume auch in die darunterliegenden Schichten gelangt war und das Ergebnis auf diese Weise verfälscht hatte.

Alle vier Proben besaßen Lehmputze unterschiedlicher Zusammensetzung. Den Lehmputzen der Proben Nr. 2, Nr. 3 und Nr. 4 wurde das Aerogel ND_{PI} zugesetzt, welches das VOC-Aufnahmevermögen deutlich steigerte, wie man aus dem Vergleich der Sorptionsmassen von Nr. 1/2 und Nr. 5/6 erkennen kann. Ob die Zugabe des Aerogels CMS_{GI} in Probe Nr. 8 zu der vergleichsweise besseren Aufnahmekapazität beiträgt, kann aufgrund der bereits genannten Unsicherheit nicht eindeutig ausgesagt werden.

Die Sorptionsmasse ist bei den Proben Nr. 4 und Nr. 8 mit „>“ angegeben. Hier war die halbe Standzeit am 28 Tag nach Prüfkammerbeladung für einige Substanzen noch nicht erreicht.

Ferner ist festzustellen, dass das Aufnahmevermögen der Putze gegenüber den in die Kammerluft hinzudotierten VOCs mit abnehmender Polarität der Substanzen abnimmt. Die polaren Verbindungen 1-Pentanol, Hexanal und n-Butylacetat zeigen das größte Bestreben, anzulagern. Von den beiden unpolaren VOCs α-Pinen und n-Dekan, reicherte sich lediglich n-Dekan in den Proben Nr. 3, Nr. 4, Nr. 7, Nr. 8 und Nr. 9 in vergleichsweise geringen Mengen ab.

4.4 Monitoring von Realräumen

Die Ergebnisse aus dem Monitoring (Abbildungen 7 und 8) zeigen, dass die relative Luftfeuchte in der mit Lehmputzen und Holzweichfaser ausgestatteten Wohnung stabil im gesunden Bereich zwischen 50 – 60% liegt, was auf die Speicherkapazität des Lehms zurück zu führen ist, wie auch nachgewiesen in [1] [12]. Die niedrigen Raumluftfeuchten von bis zu 30% in der mit konventionellen Baustoffen ausgestatteten Wohnung lässt sich zum einen auf die mechanische Belüftung zurückführen, die ganztagig sehr trockene Außenluft ansaugt aber auch auf die verwendeten Baustoffe, die nicht in der Lage sind, Feuchtigkeit, die in der Wohnung z.B. durch Kochen oder Duschen generiert wird, zu speichern.

5 Potentiale für die Baupraxis, realisierte Projekte

5.1 Technische Grundlagen für ein Bausystem ohne Lüftungsanlagen

Die Untersuchungen des H-House Vorhabens befassten sich mit Innenwänden und inneren Bekleidungen der Außenwand aus Naturbaustoffen also Innendämmungen. Hier wurden für Naturbaustoffe besondere Potentiale zur Steuerung der Raumluftfeuchte und der Schadstoffe in der Raumluft nachgewiesen. Die-

se Kenntnisse lassen sich auch auf die gesamte Gebäudehülle und auf Tragwerke aus Holz, Lehm und Naturfasern übertragen.

Bei den außenluftberührenden Bauteilen Dach und Wände hat sich im Holzbau die diffusionsoffene Bauweise und somit der Verzicht auf Dampfsperren und Dampfbremsen durchgesetzt [13].

Bezogen auf den Lüftungsbedarf und die Luftqualität von energetisch optimierten, hoch dichten Gebäude aus Holz, Lehm und Naturfaserdämmstoffen lässt sich bezogen auf die drei oben genannten Hauptkriterien bei zweimaliger Stoßlüftung über die Fenster (1 x am Morgen, 1 x am Abend) folgende Aussage treffen:

Die im H-House untersuchten Naturbaustoffe steuern bei üblichen Wohnnutzungen die Innenraumluft im Winter auf den Bereich zwischen 40 und 60% relativer Raumluftfeuchte. So sind Schimmelrisiko und das Gesundheitsrisiken durch Viren bei zu geringer Raumluftfeuchten ausgeschlossen. [14] Holz-Lehm Häuser sind gerade weil sie auf Lüftungsanlagen verzichten können gesund und komfortabel.

Der Schadstoffgehalt in der Raumluft hängt wesentlich von den Baustoffen ab. Durch die Verwendung der richtigen Baustoffe kann der Schadstoffeintrag ins Gebäude sehr gering gehalten werden und liegt im gesunden Bereich. Insbesondere Lehmabaustoffe können zudem der Raumluft Schadstoffe entziehen und diese im Rahmen der freien Lüftung wieder abgeben.

Folglich ist das wesentliche Kriterium die Abführung des CO₂ das der Mensch über seine Atmung während der Raumnutzung abgibt. Der CO₂-Gehalt ist abhängig von dem pro Person zur Verfügung stehenden Luftvolumen, also der Anzahl der Menschen und der Raumgröße. Dies kann z.B. in einem kleinen Schlafraum in dem zwei Erwachsenen bei geschlossener Tür schlafen kritisch werden. Wird aber über eine offene Tür ein Verbund zu anderen Räumen hergestellt, steht ausreichend Volumen zur Verfügung und die Werte bleiben im angestrebten Bereich von < 1000 ppm.

Die Anwendung mechanischer Lüftungsanlagen ist aktuell stark in der Diskussion. Die DIN 1946-6:2009-05 [16] soll den Lüftungsbedarf regeln. Diese Norm wurde vom Ausschuss Heiz- und Raumlufttechnik erarbeitet und schließt manuelle Fensterlüftung zum Feuchteschutz – also der Schimmelvermeidung – aus. Diese Norm wird inhaltlich sehr kontrovers diskutiert und gilt nicht als „allgemein anerkannte Regel der Technik“. Es besteht in jedem Falle ein hohes Haftungsrisiko, da die Norm bislang juristisch unterschiedlich interpretiert wird. Auch wenn man eine Lüftungsanlage einbaut können einem zu hohe Investitionskosten und ein Gesundheitsrisiko über zu trockene Raumluft vorgeworfen werden.

Über Messungen in verschiedenen Wohnungen von Ziegert Roswag Seiler konnte bei zweimaliger Fensterlüftung am Tage, einmal am Morgen einmal am Abend, auch das CO₂ abgeführt und somit im vertretbaren Bereich gehalten werden. Ganz wesentlich ist vor allem die stabile Raumluftfeuchte im Winter,

Abb. 10 Klimaaktives Bausystem ohne Lüftungsanlage

Klimaaktives Bausystem aus Holz und Lehm

- 01 Baugrund
- 02 Bodenplatte, Schaumglasdämmung, Stahlbeton
- 03 Wände Holzbau, Zellulose
- 04 Dach Holzbau, Zellulose
- 05 Bodenaufbau EG, Fussbodenheizung
- 06 Innenwand Holzbau, Lehm
- 07 Decke Brettstapel
- 08 Lehmbeleidung, Steuerung Raumklima
- 09 Passive Solarenergienutzung über Fenster
- 10 Wärmeversorgung über Fussbodenheizung
- 11 Solarenergienutzung Solarkollektor
- 12 Schichtenspeicher, integrierter Gasbrenner
- 13 Zusatzheizung, Passivhauskamin

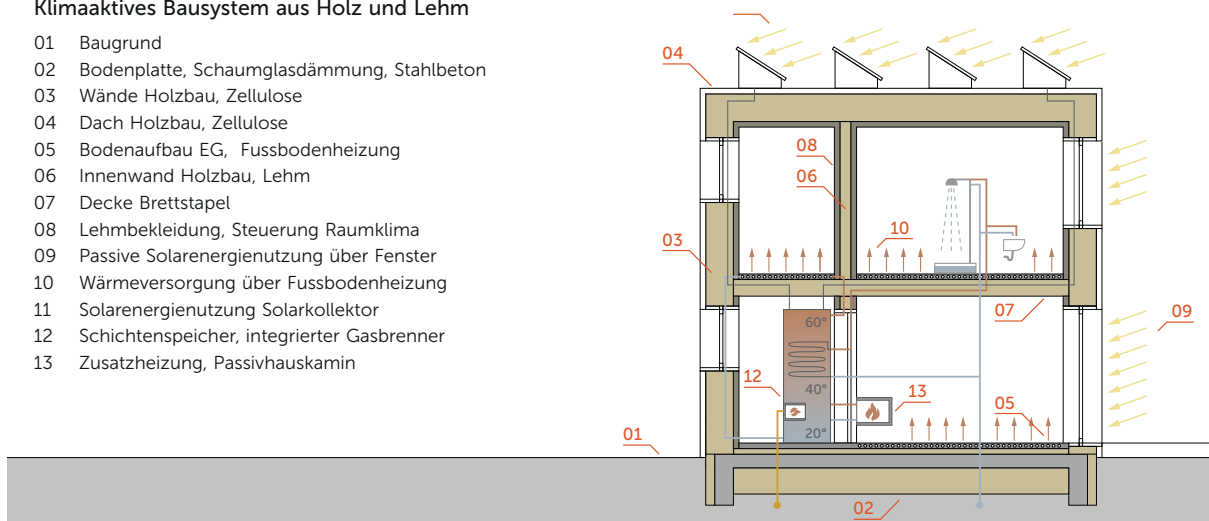




Abb. 11 Holz-Lehm Wand mit Heizungssystem (Torfremise, Schechen)

die im gesunden und komfortablen Bereich zwischen 45 und 60% lag. Über die Temperaturmessungen konnte zudem der immer wieder beschriebene hohe sommerliche Wärmeschutz im Vergleich zu konventionellen Gebäuden nachgewiesen werden. Die Innenraumtemperatur lag an heißen Sommertagen ca. 8° unter der Außentemperatur Spitze und unter 30°C. Dieses Phänomen ist sicher auch auf die hohe Sorptionsfähigkeit im Tag-Nacht Wechsel bei intensiver Nachtauskühlung zurück zu führen.

5.2 Klimasteuerndes Bausystem aus Holz, Lehm u.a. Naturbaustoffen

Grundlage des Holz-Lehm Hauses ist ein angemessener Glasanteil, der zwischen Energiegewinn, aber auch -verlust im Winter und Wärmeeintrag im Sommer vermittelt. Wesentliches Kriterium ist zudem die angemessene Versorgung mit Tageslicht. Der diffusionsoffene, opake Anteil der Gebäudehülle trägt zur Klimasteuerung und somit zum Komfort Haus bei.

Wie bei allen energetisch optimierten Gebäuden haben die opaken Außenbauteile des Holz-Lehm Hauses sehr geringe U-Werte, die in der Regel zwischen 0,15 und 0,10 W/(m²K) liegen. Dies kann z.B. über ein Tragwerk aus KVH 6 x 30 mit beidseitiger Bekleidung mit Holzfaserplatten als Raumabschluss erreicht werden. Die Holzfaserplatte bildet die winddichte Ebene ohne „Folien“ kleben zu müssen. Diese Aufbauten werden innseitig in der Regel mit einem Lehmheizputz und außenseitig mit einer hinterlüfteten Fassade bekleidet. Als Dämmstoff werden üblicherweise Holzfasern oder Zellulose in die Wände eingeblasen. Durch die kapillaraktiven Naturbaustoffe und das diffusionsoffene Bausystem entsteht eine robuste, schadstoffarme, dauerhafte Bauweise. Als Fenster kommen oftmals dreifachverglaste Holzfenster zum Einsatz, deren Blendrahmen zur Vermeidung von Kondensat auf den Scheiben an kalten Wintertagen überdämmt werden sollten (Abbildungen 10 und 11).

5.3 Bauen im Lebenszyklus

Das Holz-Lehm Haus kann aufgrund seiner hochdämmenden Hülle und der ausgewogenen Glasflächen über gebäudeintegrierte Energiegewinnung klimaneutral betrieben werden. Durch die vorrangige Verwendung erneuerbarer und nachwachsender Baustoffe kann auf fossile, nicht erneuerbare Ressourcen weitgehend verzichtet werden. Für die Zukunft gibt es Entwicklungs- und Forschungsbedarf für ressourceneffiziente Gründungen, die auf Zement und Stahl verzichten können. In Zukunft wird es zudem um die Planung der Wiederverwendbarkeit von Baumaterialien, also die Reversibilität von Baukonstruktionen gehen, um diese direkt im Rahmen von Umbaumaßnahmen wieder zu verwenden bzw. für andere Zwecke nutzen zu können.

Abb. 12 Reversible Holzbaukonstruktion in Bestand und Neubau (Torfremise, Schechen)





Abb. 13 Flexim GmbH, 3. OG ohne Innenausbau und Außenansicht Eingangsbereich, Render

5.4 Beispiele

Historische Torfremise

Die historische Torfremise stand bis 2005 an ihrem alten Standort wo sie einer Transformation des Gewerbegebietes weichen musste und von den Bauherren abgebaut wurde. Am neuen Standort in Schechen erhielt sie eine Neugründung um die Integration eines Niedrigstenergiehauses in Holz-Lehm Bauweise zu ermöglichen. Die hochdämmende Konstruktion aus Holz und Lehm ermöglicht den Verzicht auf eine Lüftungsanlage. Über die Gewinnung von solarer Energie (Warmwasserkollektor) und die Verwendung von Brennholz aus dem eigenen Wald wird das Werkstatt- und Wohnhaus klimaneutral betrieben. Die Dachfläche würde den Betrieb als Plusenergiegebäude ermöglichen. Weiße Lehmmedelputze und geseifte Tannenböden prägen den Innenraum. Das historische Tragwerk, meist handgehacktes Bauholz, wurde gewaschen und nach dem Einbau geölt. Durch den großen Dachüberstand und den Versatz zur historischen Lattenfassade wurde der Einsatz von Lehmmedelputz auch auf der Außenseite der Wände möglich. Der eingesetzte Neubau steht somit ganz selbstbewusst als eigenständiger Baukörper und doch in einer untrennbaren Verbindung mit dem Vergangenen (Abbildung 12).

Neubau Betriebsgebäude Flexim GmbH, Berlin

Das Betriebsgebäude überführt die Ergebnisse des H-House Vorhabens in den Gewerbebau und realisiert das Konzept auf knapp 14.000 m² BGF. Die Gebäudehülle bilden diffusionsoffene Wandaufbauten, die auf der Innenseite mit einer Gipsfaserplatte bekleidet sind. Gipsfaser sorbiert mit ca. 45g/m² zwei Drittel an Luftfeuchtigkeit dessen, was ein Lehmputz sorbiert aber immerhin das dreifache von Gipskarton. Es eignet sich im Gewerbebau um einen Kompromiss zwischen Preis und Leistung zu bilden. Auch die Innenwände sind aus Gipsfaserwänden mit Naturfaser Dämmung geplant und steuern so das Raumklima mit. Eine weitere große klimaaktive Fläche bilden die unbehandelten Holzbeton-Verbunddecken (Abbildung 13).

Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde ermöglicht durch die Förderung des 7. Rahmenprogramms der Europäischen Union für Forschung, Technologische Entwicklung und Demonstration unter der Fördernummer 608893 (H-House, www.h-house-project.eu).

Autoren

¹ Ziegert| Roswag | Seiler Architekten Ingenieure
Schlesische Straße 26, Aufgang A, 10997 Berlin, D
Andrea Klinge – klinge@zrs-berlin.de
Telefon: +49 (0)30 398 00 95 -0

² Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, D

³ Svenska Aerogel AB
Strömmavägen 2, 80309 Gävle, Schweden

Referenzen

- [1] Minke, G. (2012) Handbuch Lehm-bau 8. Auflage. Stau-fen bei Freiburg: ökobuch Verlag
- [2] Röhlen, U., Ziegert, C., (2010) Lehm-bau-Praxis: Planung und Ausführung
- [3] DIN 18947, 2013. Lehmputzmörtel – Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren
- [4] ISO 16000-part 3, 2011. Indoor air – Determination of formaldehyde and other carbonyl compounds in indoor air and test chamber air – active sampling method
- [5] ISO 16000-part 6, 2011. Indoor air – Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA® sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS or MS-FID
- [6] ISO 16000-part 9, 2007. Indoor Air – Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing – emission test chamber method
- [7] ISO 16000-part 11, 2006. Indoor Air – Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing – sampling, storage of samples and preparation of test specimens
- [8] prEN 16516, 2015. Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft
- [9] Ausschuss für die gesundheitliche Bewertung von Bauprodukten (AgBB), 2015. Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VVOC, VOC und SVOC) aus Bauprodukten, http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/dokumente/ag-bb-bewertungsschema_2015_2.pdf. (Seite zuletzt am 13.09.2016 besucht)
- [10] ISO 16000-part 24, 2009. Indoor air-Performance test for evaluating the reduction of volatile organic compound (except formaldehyde) concentrations by sorptive building materials
- [11] Richter et al., 2013. System to generate stable long-term VOC gas mixtures of concentrations in the ppb range for test and calibration purposes. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 7(3): 103-106.
- [12] Klinge, A. (2013) Natural materials with high hygroscopic properties in naturally ventilated buildings, Master thesis, London Metropolitan University
- [13] Eckerman W., Ziegert C. (2006) Auswirkung von Lehm-baustoffen auf die Raumluftfeuchte
- [14] DIN 68800-2:2012-02 Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau
- [15] E. Grandjean (1989) Wohnphysiologie. Grundlagen gesunden Wohnens
- [16] DIN 1946-6, 2009. Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung